

단순지지보의 진행파 구현 실험

⁰박성진*, 윤신일*, 한상보**

Generating a Traveling Wave on the simply Supported Beam

Park Sung-jin , Yun Shinil , Sangbo Han

ABSTRACT

Traveling wave on the structure can be generated by superposing two standing waves. Precise matching of the amplitudes and phase shift between two standing waves in time and space is the key to the success of generating a traveling wave. The principle of generating a traveling wave on the structure is utilized in the construction of linear and rotary type ultrasonic motors. This paper demonstrates experimentally generating a traveling wave on the simply supported beam.

1. 서론

초음파 모터는 새로운 형태의 동력 발생 장치로써 그 작동 원리의 독특함과 응용분야의 다양함으로 인하여 많은 주목을 받고 있으며, 최근 그 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

초음파 모터는 기존의 전기적 모터와는 완전히 다른 전기-기계 에너지 변환 모터이다. 초음파 모터의 원리는 압전소자에 교류전압을 입력하여 진동하는 성질을 이용해서 그로 인해 발생하는 파동 에너지를 마찰력에 의해 기계적 운동에너지로 변환시키는 것이다.

초음파 모터는 압전소자에 의한 초음파 진동을 이용한 마찰 구동형 모터이므로 기존의 전자식 모터와는 달리 철심과 코일이 없는 구조를 갖는 모터로서 그 특성으로는 고응답성과 저속에서의 고출력, 구조의 단순성, 다양한 형태, 자기장의 영향을 받지 않고, 소음이 적은 장점을 갖는다.

PZT계 압전진동자에서 발생하는 초음파 에너지를 모터의 구동방식으로 채택하려는 시도는 1973년

미국의 N.V. Barth⁽¹⁾에 이어 1977년 소련의 V.V. Lavrinenco와 1983년 일본의 Sashida⁽²⁾ 등의 연구가 있었으나 압전세라믹의 용력의 한계와 기계적 열화, 낮은 변환효율, 구동부분의 마모 및 온도상승 등에 의한 압전특성의 열화로 인한 문제점 등 아직도 많은 연구가 필요한 분야이다.

일본을 중심으로 한 본격적인 연구 개발의 발단이 된 진행파형 초음파 모터의 시험제작이 행해진 이래 약 10년이 경과한 지금은 이미 몇 개의 초음파 모터가 실용화되고 그 방식도 다양해졌다. 그러나 국내에서는 이 분야에 대한 관련 기업이 몇 안 되는 실정이며 아직도 연구 수준에 머무르고 있다.

본 연구에서는 초음파 모터 제작의 사전 준비 작업의 일환으로 단순보에 진행파를 발생시키는 실험을 행하고 이를 통한 진행파 구현의 문제점들을 짚어 보고자 한다.

2. 단순보에서의 진행파 발생과 동작 원리

탄성체의 표면에 부착된 압전세라믹에 교류 전압을 인가시키면 압전세라믹이 부착된 점을 중심으로 양쪽 방향으로 진행되는 굽힘 진동이 발생하고 일

* 경남대학교 대학원 기계설계학과

** 경남대학교 기계자동화공학부

정한 거리를 두고 발생된 또 다른 굽힘진동과 중첩될 경우 한쪽 방향으로 진행하는 진행파가 발생되게 된다⁽³⁾.

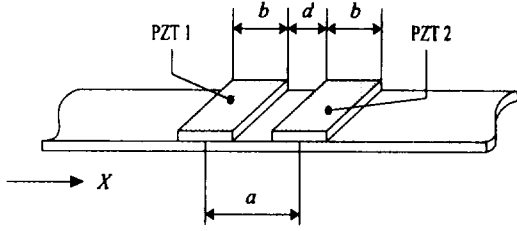


Fig. 1 Excitation of a flexural wave by bonded piezo-ceramics

Fig. 1에서 구조물에 부착된 PZT1과 PZT2에 의해 각각 발생하는 진행파는 식(1)과 식(2)로 표현된다.

$$A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \quad (1)$$

$$A \sin\{\omega t - k(x+a) + \phi\} + A \sin\{\omega t + k(x+a) + \phi\} \quad (2)$$

여기와 ω 와 k 는 각각 진동수와 파동수를 나타낸다. PZT1과 PZT2에서 발생된 진행파가 한쪽 방향으로만 진행하기 위해서는 다음의 식을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= m\pi & (m: \text{even}) \\ \phi_2 &= n\pi & (n: \text{odd}) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 식(4)를 만족시키는

$$\begin{aligned} \phi_1 &= -ka + \phi = m\pi \\ \phi_2 &= +ka + \phi = n\pi \\ 2ka &= (n-m)\pi \end{aligned} \quad (4)$$

두 개의 진행파를 합치게 되면

$$\begin{aligned} &A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \\ &+ A \sin(\omega t - kx + m\pi) \\ &+ A \sin(\omega t + kx + n\pi) \\ &= 2A \sin(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (5)$$

와 같이 한 방향으로 진행하는 진행파가 발생한다. Fig. 1의 a 와 식(4)의 ϕ 는 다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} a &= \frac{\lambda}{4}(n-m), \quad n \neq m \\ \phi &= \frac{\pi}{2}(n+m) \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로, 한 방향으로 진행하는 진행파는 굽힘진동을 일으키는 각각의 PZT가 진행파 파장의 1/4의 간격으로 붙어 있어야 하며, PZT1과 PZT2에 발생하는 교류 전압이 시간적으로 $\pi/2$ 의 위상각을 가져야 한다.

3. 실험장치 및 실험 방법

3.1 단순보의 구현

992×50×3 mm의 복합재료로 제작된 단순지지보에 대한 진행파의 실험적 구현을 위해서 Fig. 2에 나타난 것처럼 54.6×54.6×0.191 mm 규격의 PZT 4개를 보에 접착하였다.

단순지지보를 실험 대상으로 선정된 이유는 굽힘진동의 진동형에서 한 파형의 길이가 보 길이 전체에 걸쳐서 동일한 경우는 단순보 밖에 없기 때문이다. 앞 절에서 살펴 본 바와 같이 서로 다른 위상차를 갖는 파형이 공간상으로 정확한 배치를 이루고 있을 경우에만 진행파가 발생되므로 이 조건을 충족시킬 수 있는 가장 손쉬운 구조물로 단순지지보를 선택하였다. 그러나, 역설적으로 실험적으로 구현하기 가장 어려운 경계조건이 바로 단순지지이다.

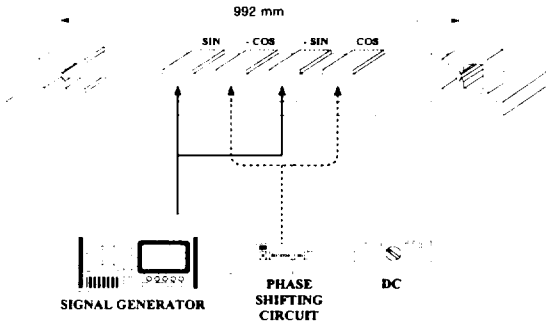


Fig. 2 Dimensions and layout of the test beams

본 실험에서는 Fig. 3과 같은 칼날 형태의 지지구조물을 사용하여 단순보를 구축하고자 하였다.

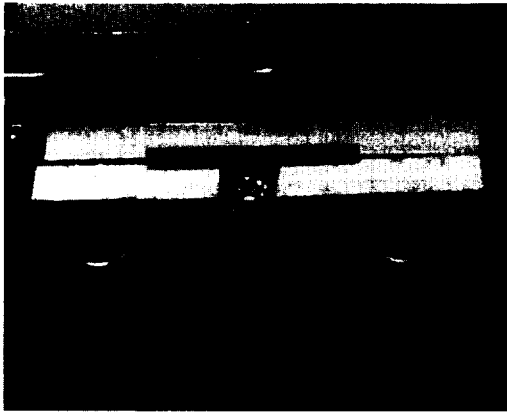


Fig. 3 Photograph of Boundary condition

보의 굽힘 진동을 유발시키는 압전재료의 효과를 극대화하기 위하여 비교적 연성의 복합재를 사용

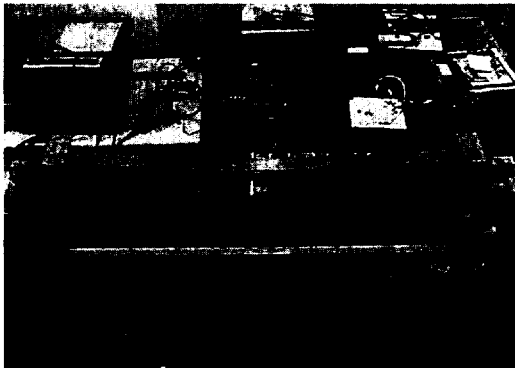


Fig. 4 Photograph of deflected beam

하였고, 그 결과 Fig. 4와 같이 보의 자중에 의한 처짐 현상으로 인하여 단순지지 구현이 실현되지 않았다. 보의 처짐 현상에 의한 비선형 현상을 배제하기 위하여 보의 처짐이 있는 상태에서 보의 양단에 인장 하중을 가하였고 그 결과 1차 및 2차 모드를 제외한 고차 모드에서의 단순보 거동을 보이는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다.

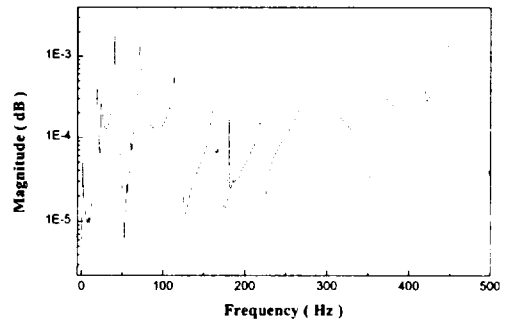


Fig. 5 Frequency response function of the simple beam

Fig. 5는 단순지지보의 경계조건을 만족하는 실험 대상 보의 주파수 응답함수를 나타낸 것이며 주파수대역은 500 Hz이다.

보의 횡진동에서 식(7)로부터 이론적인 단순지지보의 고유진동수를 구하면 βl 의 제곱의 배수로 증가하는 것을 알 수 있다.

$$f = \frac{1}{2\pi} (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (7)$$

Table 1은 이론상의 고유진동수와 실험적으로 구한 보의 고유진동수를 나타낸다.

Table 1에서 이론상의 고유진동수와 실험에서의 고유진동수와 비교해보면 실험상의 고유진동수도 제곱의 배수로 증가함을 볼 수 있다.

Table 1 Comparison of theoretical and experimental natural frequencies of the beam (Hz)

Mode	Theory	Experiment
3	41.16	42.5
4	75.99	75
5	118.75	116.25
6	171	167.5
7	232.75	228.75
8	303.99	297.5

3.2 PZT 부착

단순보에 진행파를 발생시키기 위해 PZT를 보에 부착해야 하는데 진행파의 파형은 보의 8차 모드를 선택하였다. 식(6)의 관계에 의해서 8차 모드 파형에 대한 1/4 파장 간격으로 4개의 PZT를 부착하였고, Fig. 2와 같이 각각의 PZT에 위상차를 가진 신호를 입력하였다.

여기에서 PZT의 효과를 극대화시키기 위해서는 PZT와 보의 접착 시 완전결합이 이루어져야 하는데, 만약 PZT와 보가 접착 시 완전결합이 이루어지지 않을 경우에는 PZT가 가지는 취성에 의해 깨어질 우려가 있으며, 또한 보에 정확한 신호를 전달시키지 못한다.

보와 PZT의 결합은 Fig 6과 같이 실리콘 계열의 상용 접착제인 ARALDITE를 사용하였으며 PZT

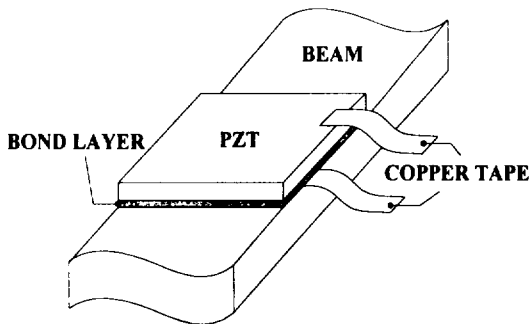


Fig. 6 Distribution of Beam, Bond layer, PZT and Copper tape

에 입력신호를 인가하기 위하여 PZT와 보 사이에 copper tape을 삽입하였고, 좀더 나은 전도성을 부여하기 위하여 silver paste를 사용하였다.

3.3 위상지연회로 구성

초음파 구동을 위해서는 정확한 진행파를 구현하여야 하는데, 이를 위해서는 인가신호의 정확한 발생이 무엇보다도 중요하다. 즉, 인접하게 부착된 PZT에 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 신호를 부여하여야 한다.

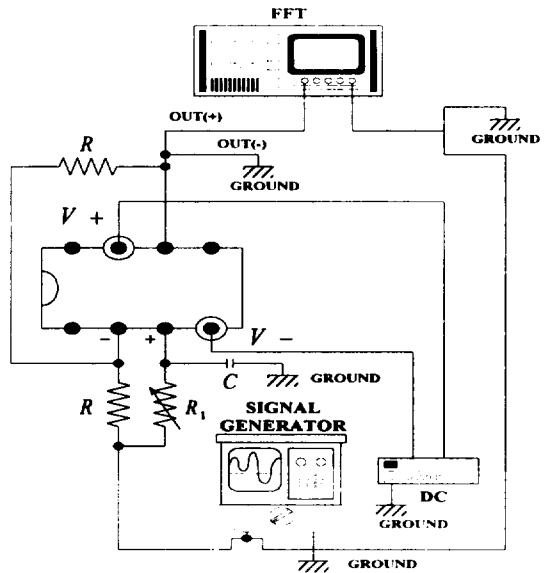


Fig. 7 Phase shifting circuit

이에 본 연구에서는 입력 신호를 간단한 전자소자를 이용하여 위상을 지연시켜 PZT에 인가하였다. Fig. 5는 본 연구에 적용한 위상지연회로를 보여주고 있는데, 각각의 PZT에 인가된 신호는 signal generator를 통한 신호와 signal generator의 신호가 phase shifting circuit을 통해 지연된 신호가 입력된다.

이렇게 입력된 신호는 각각의 PZT에 강제진동의 형태로 압전공진을 일으키고 두 개의 정재파가 $\pi/2$ 의 위상차로 중첩되어 진행파를 생성하게 된다.

4. 실험결과 및 고찰

실험보가 단순지지보의 경계조건을 만족하는지의 타당성 여부는 Table 1에서 보여지는 것과 같이 단순보의 주파수 응답함수 분석을 통한 고유진동수와 이론적 고유진동수의 비율을 비교하여 확인

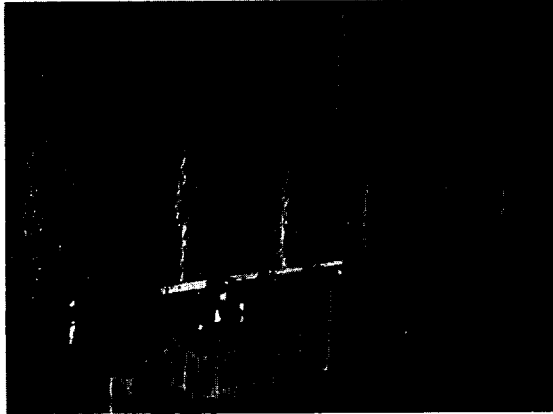


Fig 8 Photograph of node point

할 수도 있으며, Fig. 8에 보이는 것과 같이 PZT에 의해 강제 진동되는 8차 모드의 절점 구현 여부를 통해서도 확인할 수 있었다. 본 연구에 적용한 위상지연회로는 최대 입력 전압이 15V로 한정되어 PZT의 굽힘모멘트 발생량의 크기가 상대적으로 미약해서 단순보에 위에 슬라이더를 이동시키기에 충분한 변위가 발생하지 못했다.

5. 결론

이상과 같이 초음파 모터 제작의 사전 준비단계로 단순보에 진행파를 발생시키는 실험을 행하였는데, 몇 가지 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 본 연구에서 구현한 모델이 이론적인 단순보의 경계조건을 만족한다는 것을 절선의 형태와 실험을 통해서 알 수 있었고, 둘째 미세 분말을 이용하여 진행파가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

보와 압전재료를 결합시키는데 있어서 일반적인 접착제가 보와 압전재료의 거동에 대한 영향을 고려해서 접착제 또는 접착방법을 달리 하여 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되고, PZT에 인가되는 전압이 미약하여 가시적으로 확연하게 진행파

가 발생하는 것을 파악할 수 없었으며, 향후 PZT의 최대 허용 전압에 가까운 신호를 발생시킬 수 있는 Driving Circuit의 개발에 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- (1) Barth, H. V., 1973, Ultrasonic driven motor. IBM Technical Disclosure Bulletin, 16, 2263
- (2) T. Sashida, 1985, Motor device utilizing ultrasonic oscillation; 29 claims and 22 Drawings. U.S Patent, 4, 868, 446
- (3) S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nakamura, 1993, "Ultrasonic Motors Theory and Applications." Oxford, Clarendon Press, p.10
- (4) T. Sashida and T. Kenjo, 1993, "An Introduction to Ultrasonic Motors." Oxford, Clarendon Press, p.297
- (5) Bar-Cohen Y., X. Bao, and W. Grandia, 1998, "Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves," Proceedings of the SPIE International Smart Material and Structure Conference, SPIE Paper No. 3329-82, San Diego, CA, 1-6 March
- (6) P. Hagedorn and J. Wallaschek, 1992, "Travelling wave ultrasonic motors, Part 1: Working principle and mathematical modelling of the stator," J. Sound and Vibration, vol. 155, no. 1, pp. 31-46
- (7) J. Wallaschek, P. Hagedorn, and W. Konrad, 1993, "Travelling wave ultrasonic motors, part II: a numerical method for the flexural vibrations of the stator." Journal of Sound and Vibration, vol. 168, pp. 115-122
- (8) T. Maeno, T. Tsukimoto, and A. Miyake, 1992, "Finite-Element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor," IEEE Trans, Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., vol. 39, no. 6, pp. 668-674

- (9) Kagawa K., T. Tsuchiya and T. Kataoka, 1996, "Finite Element Simulation of Dynamic Response of Piezoelectric Actuators," J. of Sound and Vibrations, Vol. 89(4), pp. 519-538
- (10) Nesbitt W. Hagood and Andrew J. McFarland, 1995, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 42, no. 2, pp. 210-224
- (11) N. Hagood, W. Chung, and A. von Flotow, 1990, "Modeling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control." J. Intell. Mat., Syst., and Struct., vol. 1, July, pp. 327-354
- (12) H. Hirata and S. Ueha, 1993, "Characteristics estimation of a traveling wave type ultrasonic motor," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., vol. 40, no. 4, pp. 402-406
- (13) K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha, 1993, "Design of a hybrid transducer type ultrasonic motor," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., vol. 40, no. 4, pp. 395-401
- (14) A. Kumada, 1987, Ultrasonic motor using bending, longitudinal and torsional vibrations: 10 claims and 14 drawing sheets, U.S Patent, 4, 642, 509
- (15) A. Kumada, 1989, Piezoelectric revolving resonator and ultrasonic motor; 10claims and 17 Drawing Sheets, U.S Patent, 4, 868, 446
- (16) P. Hagedorn and J. Wallash, 1992, "Travelling wave ultrasonic motors, part I : Working principle and mathematical modeling of the stator." Journal of Sound and Vibration, vol. 155, pp. 31-46
- (17) G. Ramaish and K. Vijayakumar, 1973, "Natural frequencies of polar orthotropic annular plaes," J. Sound and Vibration, vol. 26, pp. 517-531